

東京大学大学院 学生会員○ 中村 博一
 東京大学生産技術研究所 正会員 山崎 文雄

1. はじめに 空間的に広がりを持つ構造物に対する地震外力を考える場合、複数地点を含む空間変動をも考慮する必要がある。また、地震動は局所的な地盤の影響ばかりではなくその震源特性や伝播経路にも影響されると考えられ、個々の地震動に対する考察が必要である。地震波動の空間変動特性を表す確率モデルとしては振動数空間領域におけるコヒーレンスがあり、何らかの方法によりパワースペクトルと見かけの速度が得られれば、確率的に時空間で変動する地震波動をシミュレートすることができ、その用途は広い。このような空間変動を表すモデルとしては、すでに幾つかのアレー観測記録の統計処理に基づくもの^{例えば1)2)3)}が提案されているが、まだ改善の余地が残されていると考えられる。そこで本報告では、これらの既往のモデルを参照し、千葉アレー⁴⁾の個々の観測記録を確率統計的に処理することにより、数百メートル四方の自由地盤における地震波動の空間変動を対象とした確率モデルを提案する。そしてそのモデルのパラメータの値に対して検討する。

2. アレーデータの処理 東京大学生産技術研究所の千葉実験所構内には非常に高密度な3次元アレーが設置されており、ここではその平面アレーにより観測された4つの加速度記録を用いて解析を行う。そして各加速度記録の主要動部分に対して定常性を仮定して、2地点間の同一方向成分に対して空間変動特性を表すコヒーレンスについてモデル化する。本来、振動数空間コヒーレンスは母集団平均から求められるべきものであるが、実用性という観点から普通は母集団平均の代わりに振動数領域での平滑化により求められる。しかし高振動数域では、地震波動というよりはむしろそれに起因する散乱波などのノイズ的な成分が多く含まれているにもかかわらず、その平滑化のみでは低振動数域よりも高振動数域のコヒーレンスの方が大きくなる場合があり、不十分である。ノイズ的な成分間のコヒーレンスであれば、いくつかの平均をとることによりそれらは互いに打ち消しあって全体としては小さくなると考えられ、本研究では試行錯誤の結果として、振動数域の有効帯域幅が0.6 HzのParzen平滑化ウィンドーに加えて、ウィンドー幅が1000点、移動幅が10点の時間域の重複移動ウィンドーをも用いた。ここで、移動回数は100回とした。この時間ウィンドーは重複しているため、ここから求められる統計量は厳密には独立ではないが、実用上ではほぼ同様の効果をもつものと考えられる。

3. 振動数空間コヒーレンス ここでは2地点間の相互スペクトルの絶対値を各地点のパワースペクトルの相乗平均で除したものを、コヒーレンスと定義する。コヒーレンスの空間的な傾向を見るために、ここで示した方法を用いて105組の2地点間の同一成分の加速度記録に対するコヒーレンスを求め、図1に示すように固定した振動数に対して空間上にプロットした。中心振動数1 Hzにおいてこの空間コヒーレンスは、震央方向とその直交方向とでその減少のしかたが多少異なっているが、原点に対して連続関数としてモデル化できることがわかる。中心振動数3 Hzと5 Hzにおいては、原点に対する連続性がなくなり、距離がゼロ付近において急激な落差を生じていることがわかる。これは高振動数になるに従い、信号成分に対するノイズ成分が増加しているためであると考えられる。

ノイズ成分に関しては、Capon⁵⁾により、各地点間の加速度記録のノイズ成分が無相関であり、さらに一定であるという仮定のもとに、対象とする振動数に対して、2地点間の同一方向成分のモデルが次式のように示されていた。

$$\gamma_{ij}(f) = 1 - R^j, \quad j \neq i \quad (1)$$

ここで R^j は、加速度記録の全パワーに対する無相関なノイズ成分のパワーの比である。

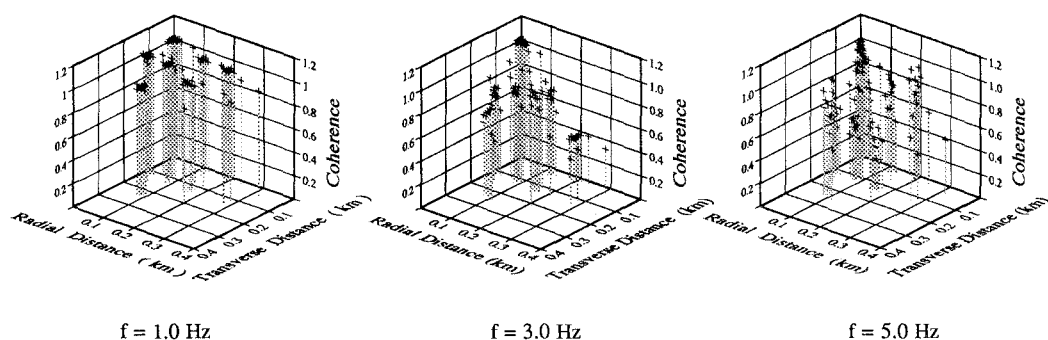


図1 固定した振動数での震央に直交方向の加速度成分に対するコヒーレンス（イベント 8519）

既往のコヒーレンスモデルとしては、SMART-1 アレーの一部の加速度記録を用いた解析により Hao ら²⁾ は、非等方性モデルを提案した。また Lotung LSST アレーで観測されたうちの 15 の地震記録を用いて、それらが全て同じ重みを持つものとして、Abrahamson ら³⁾ は、等方性モデルを提案した。しかしながら、震源特性などによる影響を確率モデルに取り込むためにも、まだ個々の地震記録に対する検討が必要であると思われる。

既往のモデルやここで得られた結果を参照し、本研究においては次式に示すコヒーレンスモデルを提案する。

$$\gamma(\xi_{jl}^r, \xi_{jl}^i, f) = \delta_{jl}^H \exp \left\{ -\frac{f^2 + c_2^2}{c_1^2} \left(\xi_{jl}^2 + c_3^2 \xi_{jl}^2 \right) \right\}, \quad \delta_{jl}^H = \begin{cases} 1, & j=l \\ 1-c_0 f, & j \neq l \end{cases} \quad (2)$$

ここで ξ_{jl}^r, ξ_{jl}^i は、各々 2 地点間の相対距離である空間ラグ (km) の震央方向成分とその直交方向成分である。また、係数 c_0 は時間の次元を持ち、振動数領域において、信号成分に含まれるノイズ成分の割合の変化率を表す。これは、図 1 の空間座標の原点付近の急激な落差を表すもので、ここでは振動数に比例するものと考えた。係数 c_1 は速度の次元を持ち、波動の伝播速度に関係するものと考えられる。係数 c_2 は振動数の次元を持ち、振動数がゼロのときの空間変動を特徴づけるものである。そして無次元係数 c_3 は、低振動数領域での地震波動の伝播方向とその直交方向との空間コヒーレンスの比である。このモデルの指数部の意味については幾つか考えられるが、任意の振動数において、長さの次元を持つ第 1 項と空間ラグに対応する第 2 項との比に依存するものということができる。

4. 解析結果 ここで示した方法により 2 地点間コヒーレンスを求め、その振動数領域の極大値に対して回帰分析を行った。式 (2) で示されるコヒーレンスモデルは 4 つのパラメータを含んでおり、ここではガウスニュートン法による非線形最小自乗法を用い、モデルのパラメータの初期値を変化させることにより残差の自乗和が最小になるまで計算を繰り返し行い、その時のパラメータを最終値とした。図 2 に、その実コヒーレンス (破線) とモデル (実線) との比較を示している。ここで図中の小丸は、回帰分析に用いた点を示している。

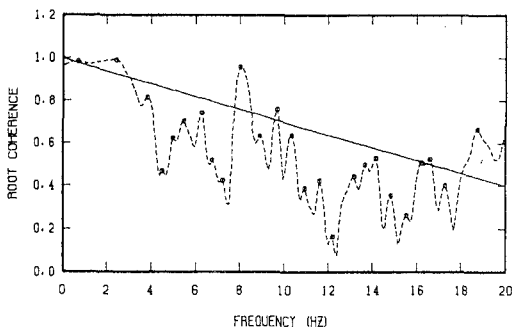
ここで提案したモデルのパラメータは、ノイズ特性、見かけの S 波伝播特性、振動数領域の初期値特性、そして空間的な異方性を示す係数であり、4 つの観測記録の震央直交成分に対して、ここで得られた各パラメータの値を表 1 に示す。伝播特性および初期値特性を表す係数 c_1, c_2 については検討中であるが、振動数領域におけるノイズ特性の変化率を表す係数 c_0 は約 0.03 sec であり、ここで取り上げたイベントについては、ほぼ同様であることがわかる。また空間的な異方性を表す係数 c_3 の値は、空間変動特性に対して必ずしも等方性を仮定できないということを示している。特にイベント 8722 (千葉東方沖地震 1987 年 12 月 17 日) は、明らかに異方性を示している。今後ここまで説明してきたことを含め、さらなる考察が必要であると思われる。

参考文献

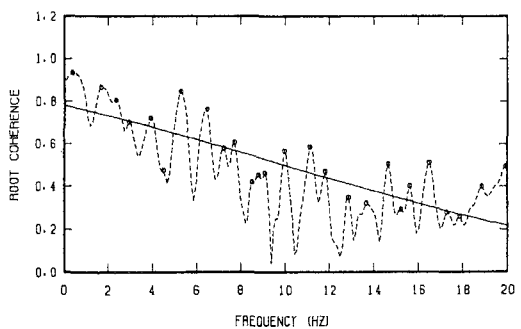
表 1 コヒーレンスモデルに対する回帰分析の結果

- 1) Yamazaki & Turker : Proc. of the 10th World Conf. Earthq. Eng., Vol. 2, pp. 651 - 656, 1992.
- 2) Hao, Oliveira & Penzien : Nuclear Engineering and Design, No. 111, pp. 293 - 310, 1989.
- 3) Abrahamson, Schneider & Stepp : Proc. of 4th Nat. Conf. Earth. Eng., Vol. 1, pp. 317 - 326, 1990.
- 4) 片山・山崎・永田・佐藤 : 土木学会論文集 第 422 号 / I - 14, pp. 361 - 369, 1990.
- 5) J. Capon : Proc. of IEEE, Vol. 57, No. 8, pp. 1408 - 1418, 1969.

Event	Final Value of Model Parameters				Residual Sqr.Sum	No. of Observ.
	c0 (sec)	c1 (km/s)	c2 (Hz)	c3 (-)		
8519	0.02984	8.945	16.05	1.116	67.7	2299
8601	0.02522	23.27	42.17	1.184	67.4	2384
8602	0.02666	9.817	21.93	0.9009	67.5	2274
8722	0.02338	4.048	7.025	0.5712	26.4	1173



(a) P2 - P4 (-4.7, 29.6) m



(b) P8 - P0 (-246.9, -110.1) m

図 2 震央直交方向の加速度成分に対する 2 地点間コヒーレンス (イベント 8519) の実測値とモデル